

歩行中の手先振動抑制に対する視覚情報の役割

東郷 俊太^{†a)} 香川 高弘[†] 宇野 洋二[†]

A Role of Visual Information for Joint Coordination to Dampen Hand Vibration during Walking

Shunta TOGO^{†a)}, Takahiro KAGAWA[†], and Yoji UNO[†]

あらまし 人間がコップの水をこぼさずに運ぶ動作に対して、視覚情報はどのような働きをするのかを調べた。手先のジャークを小さくし、コップの角度を一定に保つことがコップの水をこぼさないための条件とし、歩行中に視覚情報を遮断した場合、それらの変数ないしそれらの変数を制御する関節間の協調がどのように変化するかを調べた。水が入ったコップを持って歩行している際に、手元の視覚情報を途中で長時間遮断する場合と、遮断しない場合を比較する計測実験を行った。また、関節間の協調を定量的に評価するために UCM 解析を用いた。UCM 解析によって手先のジャークとコップの角度に関わる分散を、影響がない成分 (UCM 成分) と直接影響する成分 (ORT 成分) に分割し、関節間協調の度合を全分散に対する UCM 成分の割合と定義した。その結果、視覚を遮断することにより、手先ジャークの値に関しては影響を受けず、コップの角度の値は変化した。また、手先ジャークに関する協調度は変化せず、コップの角度に関する協調度は低下した。これらの結果から、手先振動を抑制する際に視覚情報は、コップの角度のキャリブレーションを行うのに使用され、関節間協調の維持には性能変数とその目標値の知覚が重要であることが示唆された。また、手先のジャークは視覚情報を用いずに制御することが可能であることも示唆された。

キーワード 視覚情報, 関節間協調, シナジー, ジャーク, UCM 解析

1. ま え が き

人間には自然に行うことのできる巧みな運動というものがたくさんある。その働きや制御方策を知ることは人間の脳や中枢神経系の働きを理解するうえで有益である。我々はこれまでに、巧みな運動の一つとして、“コップの水をこぼさずに運ぶ”動作の解析を行ってきた [1]。そして、この動作を達成するためには手先のジャークを小さくし、コップの角度を一定に保つことが重要であり、人間は協調動作によってそれを達成していることを示してきた。しかしこの協調動作において、具体的にどのような情報を使って、どのように制御しているのかについてまでは言及してこなかった。そこで本研究では、コップの水をこぼさずに運ぶ、すなわち歩行中の手先振動を抑制するという動作における視覚情報の働きを明らかにすることを目的とする。

そのために、視覚情報を遮断することによってタスクを達成するために制御すべき変数と関節間の協調関係がどのように変化するかを調べる。

液晶シャッターゴーグルを用いて、視覚全体を遮断しようとする、歩行自体が不安定となり、トレッドミル上での歩行は困難となる。そこで本研究では液晶シャッターゴーグルと同様の性質をもち、かつ手元の視覚情報のみを遮断できる、液晶シャッタープレートを製作した。これにより、歩行を不安定化させることなく手元の視覚情報のみを任意に遮断することができる。

また視覚情報を遮断することで協調動作がどのように変化するかを UCM 解析 [2]~[4] を用いて定量的に評価する。UCM 解析は、あるタスクにおいて制御したい変数 (性能変数) に関わる冗長性をもつ多要素 (運動要素) の分散を二つの直交する成分に分割する。一つは性能変数に影響を与えない分散成分 (UCM 成分) であり、もう一つはそれに直交し、性能変数に直接影響を与える分散成分 (ORT 成分) である。性能変数が運動要素の協調によって制御されているとすると、UCM 成分は ORT 成分よりも大きな値をとる。

[†] 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市

Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: s_togo@nuem.nagoya-u.ac.jp

ここで、視覚情報を遮断することで性能変数、協調動作はどのように変化するかを考える。視覚情報が遮断されるとすると、コップの状態を知覚できるのは体性感覚のみとなる。しかしながら、体性感覚の位置知覚には一般的に誤差が存在することが先行研究により知られている [5], [6]。よって、体性感覚による性能変数の正確な知覚・制御は困難になると考えられる。コップの水をこぼさずに運ぶには、手先のジャークを小さくし、コップの角度を一定に保つ必要がある。しかし、視覚情報を遮断することによって性能変数を制御することが困難になれば、手先のジャークは大きくなり、コップの角度は一定でなくなると推測される。また、協調動作の維持も困難になると考えられる。以上より、本研究では、視覚情報を遮断することによって手先のジャーク、コップ角度の分散は増加し、それぞれの協調度が低下するという仮説を立てる。

2. 実験方法

2.1 被験者

被験者は健康な成人男性 6 名であり、全員が右利きであった。年齢は 22 歳から 25 歳 (平均 23.2 歳) であり、身長は 164 [cm] から 177 [cm] (平均 172.8 [cm]) であり、体重は 58 [kg] から 69 [kg] (平均 63.7 [kg]) であった。本実験は名古屋大学安全厚生委員会倫理部会の承認を受けて、行われた。また、実験前に全ての被験者は実験手順の説明を受け、書面にて同意した。

2.2 実験装置

身体各部位の位置データを取得するために三次元位置計測システム (OPTOTRAK CERTUS, Northern Digital Inc. 製) を用いた (サンプリング周波数 100 [Hz])。直径 7 [mm] の赤外線マーカーを図 1 A に示すようにどちらのタスクとも 6 箇所に取り付けた。取り付け箇所はそれぞれ踝、股関節の回転中心、肩の回転中心、肘の回転中心、手首の回転中心、中指の付け根とした。

前節で説明したように、液晶シャッターゴーグルは被験者の全ての視覚を遮断してしまうので、長時間視覚を遮断しようとするすると周辺視野の情報も得られなくなるため、歩行が不安定になる。全ての視覚が遮断された状態でも歩行は可能であるが、前後左右方向に着地位置がばらつくので、トレッドミル上での歩行は非常に困難となる。そこで、全ての視覚情報を遮断するのではなく、コップを持っている手元のみ視覚情報を遮断するために、液晶シャッターフィルム (ウムフイ

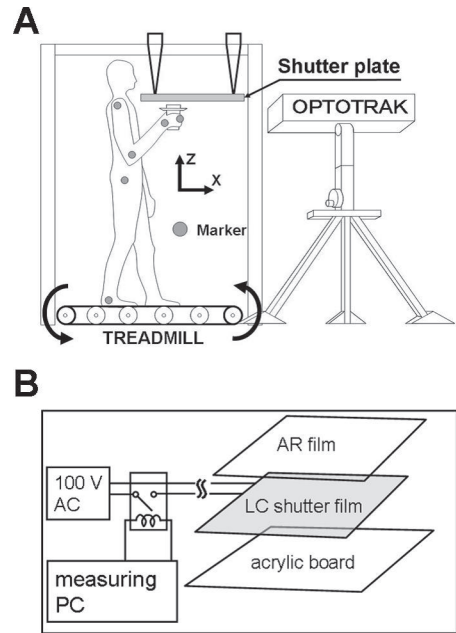


図 1 実験の概略図と使用した装置。A: 実験の様子。B: 液晶シャッタープレートの構成図。

Fig. 1 Schematic of experiment and material. A: Experimental condition. B: A liquid crystal shutter plate system.

ルム, 日本板硝子ウムプロダクツ株式会社製) を用いて液晶シャッタープレートを製作した (図 1 B)。液晶シャッターフィルムは通常時には曇りガラスのようになっており、家庭用電源の電圧 (AC100 [V]) をかけると液晶シャッターが開いて透明になる。そのサイズは縦 500 [mm]、横 600 [mm] である。また、液晶シャッターフィルムは薄いフィルムであるので、縦 500 [mm]、横 700 [mm]、厚さ 3 [mm] のアクリル板に固定した。実験室の蛍光灯による反射を防ぐために、同サイズの反射防止フィルムを液晶シャッターフィルムに貼り付けた。家庭用電源電圧のオンオフを任意に制御するために、液晶シャッターフィルムと電源の間にリレー回路を取り付け、計測用 PC から任意に制御できるようにした。この液晶シャッタープレートをトレッドミルを囲んでいるフレームに取り付けた (図 1 A)。液晶シャッター透過時には手元の様子が見え、遮断時には手元は見えなくなる。遮へいから透過には約 1 [ms] かかり、透過から遮へいへの立下りは約 10 [ms] かかる。

2.3 タスク

被験者は右手でコップを保持し、0.69 [m/s] (2.5 [km/h]) の速度でベルトが回転するトレッドミル

(PW22, 日立情報通信エンジニアリング製) 上を歩行した (図 1A)。水が入っているコップは、表面までなみなみと水を注ぎ、タスクが十分に高い難易度となるようにした。液晶シャッタープレートは被験者の首辺りの位置にくるように配置した。歩幅と歩行周期のばらつきを抑えるために、1.5 [Hz] のタイミングでメトロノームの音によって合図を与えた。また、被験者はトレッドミル上での歩行に慣れるために、タスク開始前に 5 分間の歩行練習を行った。タスクは視覚情報の有無により次の二つを設定した。

- 視覚情報が常に得られる状態で 12 分間歩行する (SO: Shutter open タスク)。
- 計測開始から 2 分間視覚あり、8 分間視覚遮断、再び 2 分間視覚ありの状態で計 12 分間歩行する (SC: Shutter close タスク)。

全被験者ともに SO タスク、SC タスクの順にタスクを行った。両タスクとも被験者はメトロノーム音に合わせて歩行すること、腕が矢状面に平行となること、コップの水をこぼさないようにすることが指示された。SC タスクにおいて、視覚が遮断されている際にも被験者自身の感覚を頼りに手先を揺らさないこと、姿勢を大きく変えないことが指示された。被験者はタスク間に 3 分程度の休憩を取った。

2.4 データ解析

中指の付け根に取り付けたマーカーの位置を手先位置と定義した。図 2 に示すように各関節角度を定義した。図 2 の水平面からの手首の角度 θ_{hor} をコップの角度と定義した。被験者はコップを持つ際、コップ全体をしっかりと保持するよう指示され、手首の角度とコップの角度が等しくなるようにした。取得した位置データにはカットオフ周波数 10 [Hz]、二次のバタワース低域フィルタをかけた。位置データの 3 階微分をとり、ジャークのデータを求めた。微分するたびにカッ

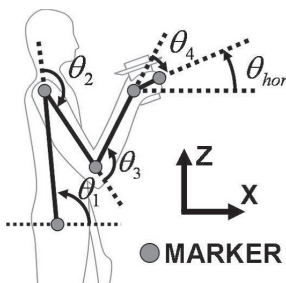


図 2 関節角度の定義

Fig. 2 Definition of joint angles.

トオフ周波数 10 [Hz]、二次のバタワース低域フィルタをかけた。踝の進行方向の速度が -0.6 [m/s] を超えた時間を歩行周期のはじめとし、UCM 解析に用いる全ての関節角のデータを歩行周期で切り出した。切り出したデータは三次スプライン補間によって 100 点で正規化された。1 タスクにかかる時間である 12 分を、pre (最初の 2 分)、during (次の 8 分)、post (最後の 2 分) に分割した。各データから歩行 1 周期分のジャーク二乗和、コップ角度の pre、post の平均値からの偏差の二乗和、UCM 解析による協調度の歩行 1 周期分の二乗和をそれぞれ求め、pre、during、post、の各区間での平均をとり、SO タスクと SC タスクを比較した。

2.5 UCM 解析

2.5.1 手先ジャークに関する UCM 解析

図 2 に示すような関節角度の定義を用い、先行研究 [1] と同様の方法で、あるトライアルでの関節角度、角速度、角加速度、角ジャークの組のばらつきを手先ジャークに影響を与えないもの (V_{UCM}^{jerk}) と直接影響を与えるもの (V_{ORT}^{jerk}) に分割した^(注1)。

$$V_{UCM}^{jerk} = \frac{\Theta_{jerk\parallel,t}^2}{n-d} \quad (1)$$

$$V_{ORT}^{jerk} = \frac{\Theta_{jerk\perp,t}^2}{d} \quad (2)$$

ここで $\Theta_{jerk\parallel,t}$ は UCM 空間に射影した運動要素の偏差、 $\Theta_{jerk\perp,t}$ は $\Theta_{jerk\parallel,t}$ と直交する運動要素の偏差、 n は運動要素の次元の数、 d は性能変数の次元の数である。先行研究において、目標軌道 $\bar{\Theta}_t$ はタスク全体の平均の 1 周期の各関節データを用いた。本研究では両タスクとも統一して、視覚情報が得られる pre、post 区間の平均の 1 周期の各関節データを用いた。

またシナジーの度合を定量的に評価するために手先ジャークの協調度 ΔV_{jerk} を以下のように定義する。

$$\Delta V_{jerk} = \frac{V_{UCM}^{jerk} - V_{ORT}^{jerk}}{V_{TOT}^{jerk}} \quad (3)$$

ここで V_{TOT}^{jerk} は全分散を運動要素の次元で正規化したものを示している。この協調度 ΔV_{jerk} は、UCM 成分が 0 の場合は -16 となり、ORT 成分が 0 の場合は 1.07 となり、 $-16 < \Delta V_{jerk} < 1.07$ の値域をとるので正規分布にはならない。そこでフィッシャーの Z 変換を用いることによって以下のように正規分布する

(注1)：導出の詳細は先行研究 [1] を参照されたい。

協調度 ΔV_{jerk}^* を定義する [7].

$$\Delta V_{jerk}^* = \log \left(\frac{\Delta V_{jerk} + \frac{n}{d}}{\frac{n}{n-d} - \Delta V_{jerk}} \right) \quad (4)$$

協調度 ΔV_{jerk}^* はシナジীর強弱を示しており, ΔV_{jerk}^* の値が大きいということは関節間協調の度合いが強い, つまり性能変数に影響を与えない分散が全分散成分の中でより高い割合を示すということである [4]. 本研究では V_{UCM}^{jerk} , V_{ORT}^{jerk} , ΔV_{jerk}^* それぞれの歩行 1 周期分の和を UCM 解析の評価として用いる.

2.5.2 コップの角度に関する UCM 解析

コップ角度の各分散成分の計算も同様に以下のように計算した.

$$V_{UCM}^{angle} = \frac{\Theta_{angle||,t}^2}{n-d} \quad (5)$$

$$V_{ORT}^{angle} = \frac{\Theta_{angle\perp,t}^2}{d} \quad (6)$$

ここで V_{UCM}^{angle} はあるトライアルにおけるコップの角度に影響を与えない関節角の組のばらつきであり, V_{ORT}^{angle} はコップの角度に影響を与える関節角の組のばらつきである. また, コップ角度に関する協調度も同様に以下のように定義する.

$$\Delta V_{angle} = \frac{V_{UCM}^{angle} - V_{ORT}^{angle}}{V_{TOT}^{angle}} \quad (7)$$

$$\Delta V_{angle}^* = \log \left(\frac{\Delta V_{angle} + \frac{n}{d}}{\frac{n}{n-d} - \Delta V_{angle}} \right) \quad (8)$$

2.6 統計解析

以下に挙げる四つのことを確かめるために二元配置分散分析を用いた. 主効果は, 時間 (pre, during, post) と, タスクの条件 (SO タスク or SC タスク) とした. Post-hoc テストには Turkey-Kramer 法を用いた (有意水準 $\alpha = 0.05$).

(1) 手先のジャーク二乗和に各時間で SO タスクの場合と SC タスクの場合で有意な差があるかどうか.

(2) コップ角度の偏差の二乗和に各時間で SO タスクの場合と SC タスクの場合で有意な差があるかどうか.

(3) 手先ジャークに関する UCM 成分, ORT 成分, 協調度 (ΔV_{jerk}^*) に各時間で SO タスクの場合と SC タスクの場合で有意な差があるかどうか.

(4) コップ角度に関する UCM 成分, ORT 成分, 協調度 (ΔV_{angle}^*) に各時間で SO タスクの場合と SC タスクの場合で有意な差があるかどうか.

3. 結果

3.1 手先ジャーク

ここでは進行方向のデータのみを掲載する. 図 3 に全ての被験者の進行方向の手先ジャークの二乗和を示す. 各被験者の平均データを 1 データとし, 全被験者 6 人分のデータの平均と標準偏差を示している. 横軸は時間であり, 縦軸は各時間区間での歩行 1 周期分の手先ジャークの二乗和の平均を示している. 白いバーが SO タスクの結果であり, 黒いバーが SC タスクの結果である. during の区間は, SC タスクにおいて視覚情報が遮断されていた期間を表している. 二元配置分散分析の結果, 時間に関する主効果 ($F(2, 30) = 1.2$, $P = 0.32$), タスクに関する主効果 ($F(1, 30) = 2.07$, $P = 0.16$), 交互作用 ($F(2, 30) = 0.06$, $P = 0.94$) 全てにおいて有意でなかった. 視覚の有無の条件によって, 手先ジャークの値に大きな違いは見られなかった.

3.2 コップ角度

図 4 に全被験者のコップ角度の pre, post からの偏差の二乗和を示す. 横軸が時間であり, 縦軸がコップ角度の偏差である. 黒い線が SO タスクの結果であり, 灰色の線が SC タスクの結果である. 二元配置分散分析の結果, 時間に関する主効果 ($F(2, 30) = 11.66$, $P < 0.05$), 交互作用 ($F(2, 30) = 8.09$, $P < 0.05$) は有意であり, タスクに関する主効果は有意でなかった ($F(1, 30) = 0.87$, $P = 0.36$). 図中の * は対応のある t 検定を行った結果, 有意な差が認められた箇所である ($t(5) = -3.00$, $\alpha < 0.05$). 視覚情報が常に得られる SO タスクの場合には, 偏差がほぼ一定の値を保っており, コップの角度が一定に保たれていることが分かる. 一方 SC タスクの場合, 視覚情報が遮断

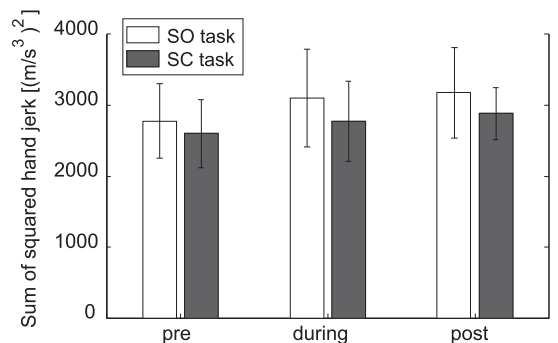


図 3 全被験者の手先ジャークの二乗和
Fig. 3 Sum of squared hand jerk of all subjects.

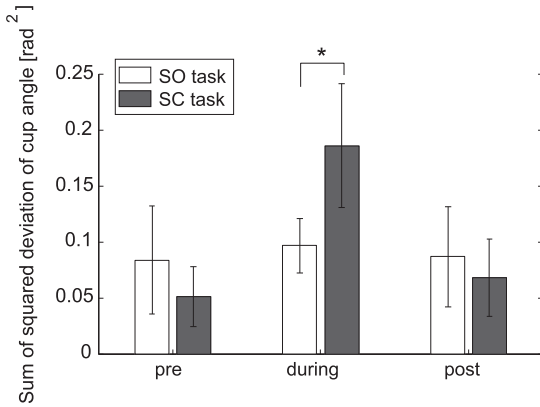


図4 全被験者のコップ角度の偏差の二乗和

Fig. 4 Sum of squared deviation of cup angle of all subjects.

されている during の区間でのみ偏差が SO タスクよりも有意に増加していることが分かる。

3.3 手先ジャークに関する各分散成分

図5に手先ジャークに関する UCM 解析の結果を示す。横軸が時間であり、縦軸は上から手先ジャークに関する UCM 成分, ORT 成分, 協調度の歩行1周期分の和を示している。白いバーが SO タスクの結果であり, 黒いバーが SC タスクの結果である。二元配置分散分析の結果を以下に示す。UCM 成分に関しては, 時間に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.56, P = 0.58$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 0.38, P = 0.54$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.04, P = 0.97$)。ORT 成分に関しては, 時間に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.4, P = 0.68$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 1.34, P = 0.26$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.12, P = 0.88$)。協調度に関しては, 時間に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.01, P = 0.99$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 0.19, P = 0.67$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.01, P = 0.99$)。手先ジャークの協調度に関しては, SO タスクと SC タスクの間で有意な差が認められた箇所はなかった。

3.4 コップ角度に関する各分散成分

図6に全被験者のコップ角度に関する協調度を示す。横軸が時間であり, 縦軸は上からコップ角度に関する UCM 成分, ORT 成分, 協調度の歩行1周期分の和を示している。二元配置分散分析の結果を以下に示す。UCM 成分に関しては, 時間に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.56, P = 0.58$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 0.38, P = 0.54$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.04, P = 0.97$)。ORT 成分に関しては, 時間に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.4, P = 0.68$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 1.34, P = 0.26$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.12, P = 0.88$)。協調度に関しては, 時間に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.01, P = 0.99$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 0.19, P = 0.67$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.01, P = 0.99$)。

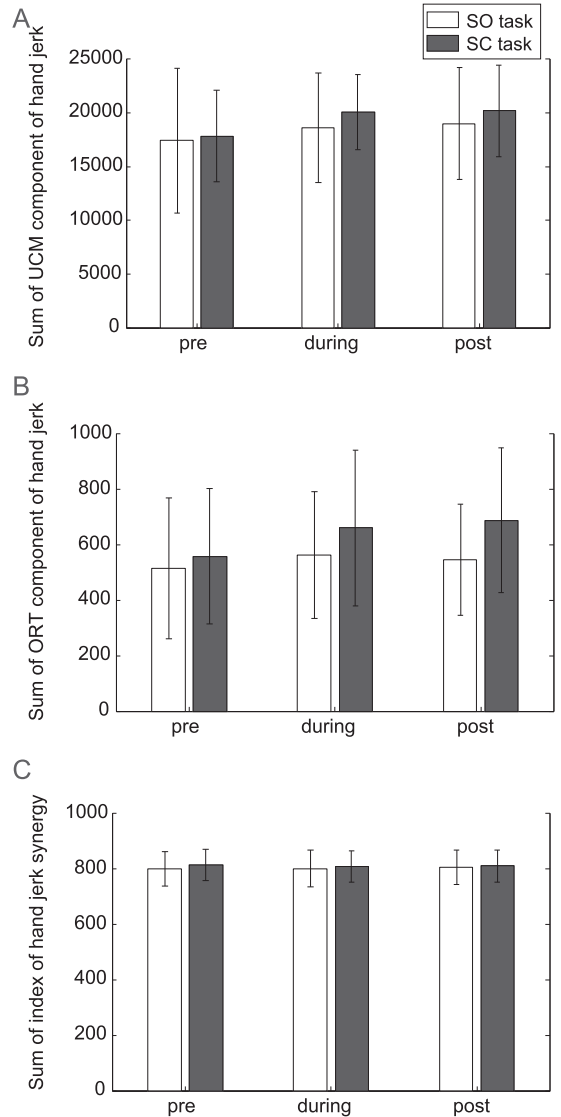


図5 全被験者の手先ジャークに関する UCM 解析の結果。A: UCM 成分 (V_{UCM}^{jerk})。B: ORT 成分 (V_{ORT}^{jerk})。C: 協調度 (ΔV_{jerk}^*)。

Fig. 5 Results of UCM analysis for hand jerk of all subjects. A: UCM component (V_{UCM}^{jerk}). B: ORT component (V_{ORT}^{jerk}). C: Index of hand jerk synergy (ΔV_{jerk}^*).

に関する主効果は有意ではなく ($F(2, 30) = 0.34, P = 0.71$), タスクに関する主効果も有意ではなく ($F(1, 30) = 1.82, P = 0.19$), 交互作用も認められなかった ($F(2, 30) = 0.27, P = 0.76$)。ORT 成分に関しては, 時間に関する主効果は有意であり ($F(2, 30) = 12.43, P < 0.05$), タスクに関する主効果

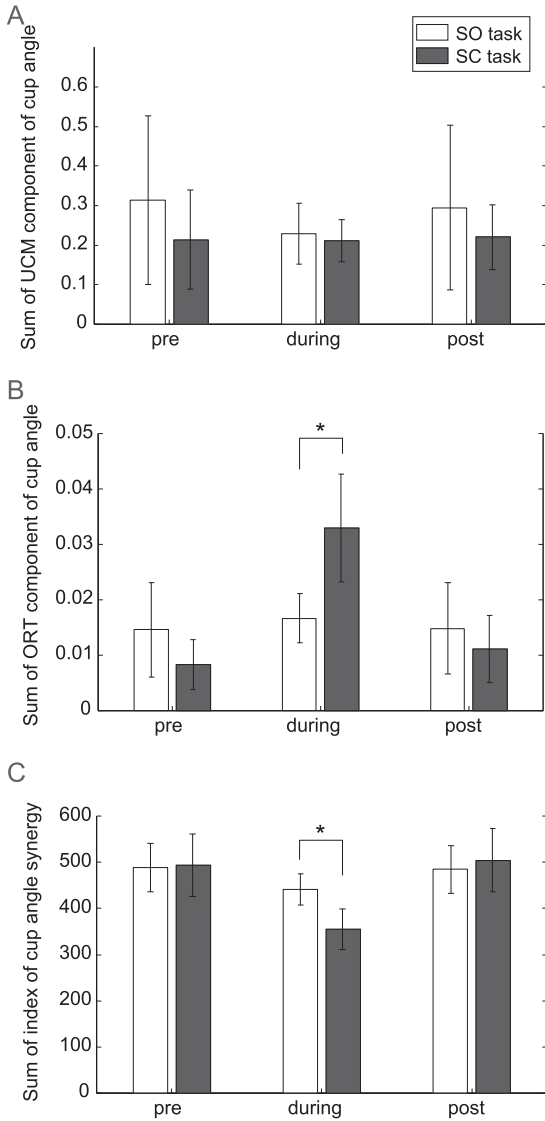


図 6 全被験者のコップ角度に関する UCM 解析の結果。
A: UCM 成分 (V_{UCM}^{angle}). **B:** ORT 成分 (V_{ORT}^{angle}).
C: 協調度 (ΔV_{angle}^*).
 Fig. 6 Results of UCM analysis for cup angle of all subjects. **A:** UCM component (V_{UCM}^{angle}). **B:** ORT component (V_{ORT}^{angle}). **C:** Index of cup angle synergy (ΔV_{angle}^*).

果は有意ではなく ($F(1, 30) = 0.75, P = 0.39$), 交互作用は有意であった ($F(2, 30) = 8.83, P < 0.05$). 協調度に関しては, 時間に関する主効果は有意であり ($F(2, 30) = 12.16, P < 0.05$), タスクに関する主効果は有意ではなく ($F(1, 30) = 1.27, P = 0.27$), 交互作用は有意であった ($F(2, 30) = 3.38, P < 0.05$). 図

中の * は対応のある t 検定を行った結果, 有意な差が認められた箇所である ($\alpha < 0.05, ORT:t(5) = -3.09$, 協調度: $t(5) = 5.34$). 視覚が遮断されることによって, SC タスクで SO タスクよりも有意に協調度が低下した. また, 再び視覚情報を得られるようになった post のデータにはタスク間での有意差は認められなかった.

4. 考 察

本研究では, 歩行中の手先振動抑制に対して, 視覚情報がどのように扱われているのかについて調べた. はじめに手先振動抑制中に視覚情報を遮断すると, タスクを達成するために重要であると考えられる, 手先ジャークとコップ角度の分散は増加し, 協調度は低下するという仮説を立てた. 手先振動を抑制しながらの歩行中に長時間, 視覚情報を遮断する計測実験を行い, 手先のジャークとコップの角度を比較した. 図 3 の結果より, 手先のジャークに関しては値そのものは変化せず, 図 5 の結果より, 協調度の変化も見られなかった. コップ角度に関しては, 図 4 の結果より視覚遮断後に偏差が増加し, 図 6 の結果より, 視覚遮断により協調度は低下した. これらは, 手先ジャークに関しては仮説とは異なる結果, コップ角度に関しては仮説を支持する結果であった. 以下にそれぞれの性能変数について詳しく考察する.

手先ジャークに関しては, 仮説とは逆に図 3 に示すように, 視覚遮断による影響はほとんど見られなかった. 更に図 5 C に示すように, 協調度の変化も見られなかった. 手先ジャークに関しては, ジャークの値, 協調度共に視覚遮断による影響が見られなく, これは視覚情報がなくとも, 手先ジャークは制御可能であることを示唆している. よって手先ジャークは, 視覚フィードバックではなく体性感覚のフィードバックやフィードフォワードで制御可能であると考えられる. また, 人間が知覚する視覚情報には一般的に 200 [ms] 程度の時間遅れがあることが知られている [8], [9]. このことから, 本研究で扱った定常的な歩行時には, 手先ジャークを視覚フィードバックによって制御している可能性は低いと考えられる.

コップ角度に関しては仮説どおり視覚遮断による影響を大きく受けた. 特に, コップ角度が視覚遮断によってシフトすることと関係して, 手先位置情報の知覚実験においても視覚遮断によって時間依存のドリフトがあることが報告されている [10]. 手先に関する視

覚情報が与えられないと、体性感覚によって知覚される手先位置と正しい手先位置との誤差は時間とともに増加する。本実験で設定したタスクでは、定常歩行で安定している状態から瞬間的に視覚を閉じている。このときコップ角度に関して被験者は遮断前の状態を保持しようとすると考えられる。そこで一つの可能性としては、前述した手先位置知覚実験と同様に、体性感覚によって知覚し、保持しようとする角度情報がシフトする可能性がある。また、我々が液晶シャッターゴーグルを用いて短時間（最大で約 3.4 秒）視覚情報を遮断する実験を行った場合、コップ角度の変化は見られなかった [11]。この結果は、コップ角度はリアルタイムな視覚フィードバックによって制御されているのではないことを示唆している。本研究の結果と併せて考えると、コップ角度に関して誤差が蓄積する時定数は比較的大きく、視覚情報によるコップ角度のキャリブレーションによってその誤差を解消していることが示唆される。

協調運動と視覚情報の関係を調べた先行研究が幾つか報告されている。結果として、協調度が上がるもの [12], [13]、協調度が下がるもの [14]、変化しないもの [12], [15] の三つに分けられる。本研究の手先ジャークに関する協調度は視覚上を遮断しても変化が見られなかった。同じく協調度が変化しなかった Tseng らの研究は、リーチング運動に関する研究である [15]。リーチング運動に関しては性能変数は手先位置であり、運動要素は関節角度である。結果は利き手に関しては UCM 成分、ORT 成分共に有意な変化が見られず、利き手でない方の手に関しては運動の後半部のみ UCM 成分、ORT 成分共に増加していた。リーチングのような短時間の運動では性能変数である手先位置が視覚を遮断することによりシフトしないとも考えられるが、リーチングのような単純な運動では学習が完了していたとも考えられる。また、Hsu らの静止立位の研究では、頭の角度を性能変数とし、関節角度を運動要素とした際、UCM 成分と ORT 成分が共に増加し、協調度は変化しなかった [12]。視覚情報を安定して得るために、頭部を安定化させることは重要であり、歩行中には頭部自体が安定となるように協調的に制御されていることが知られている [16], [17]。つまり、視覚情報がなくとも前庭感覚の情報などを用いて頭部の角度は安定となるような協調動作が日常的に学習されており、よって視覚を遮断しても協調度の変化が見られなかったと考えられる。本研究で扱ったコップの水をこぼさ

ずに運ぶタスクも日常的に行うタスクであり、手先のジャークを下げるための協調動作は体性感覚などの情報のみで制御できるように学習が済んでいるものと推測される。どのようなプロセスでこの学習が達成されているのかは今後の課題である。

コップ角度に関する協調度は視覚遮断によって低下した。これは図 6B より、ORT 成分の増加によって引き起こされたと考えられる。Ranganathan らは、左右の人差し指で指示された値の合力を発生させるタスクにおいての左右の指先力の協調関係を調べた [14]。視覚を遮断した結果、ORT 成分が UCM 成分よりも大きくなり、つまり協調度は低下した。これは指先の力の体性感覚だけでは目標の合力が分からず、結果 ORT 成分が増加することとなったと考えられる。またこの ORT 成分の増加は視覚遮断の時間割合を増やすほど、高まっていた。本研究の先行研究で行った短時間の視覚遮断実験ではコップ角度の変化が見られなかった [11]。このように、比較的短い時間であれば、視覚情報は予測的に補うことができると考えられるが、長時間遮断すると、性能変数の目標値の知覚・推定が困難となり、協調度が低下するものと考えられる。よって、安定した協調動作を達成するためには、性能変数とその目標値を知覚することが重要であるといえる。特にコップの角度を制御するには、ワールド座標と自分の手先の関係を知覚することが重要であるので、視覚情報がその知覚に重要な役割を担っていると推測される。

以上の結果から、コップの水をこぼさずに運ぶ定常歩行の際、手先ジャークに関しては体性感覚のフィードバックか、フィードフォワードによる制御、コップ角度に関しては視覚情報によるキャリブレーションが働いていることが示唆された。また安定した協調動作を達成するため、性能変数とその目標値を知覚することが重要であり、視覚情報は外部座標と身体との関係など、体性感覚では知覚できない情報を推測的に知覚していることが示唆された。リーチング運動 [18] や、把持運動 [19] などではフィードフォワードとフィードバックの二つを組み合わせたハイブリッドな制御を人間は行っているとする意見もあり、本研究で扱ったコップの水をこぼさずに運ぶタスクも、同様の性質をもっていたと考えられる。

5. む す び

本研究では、歩行中の手先振動抑制に対して、視覚

情報がどのように扱われているのかについて調べた。水が入っているコップを持って歩いている途中に長時間、視覚情報を遮断する実験によって、タスク達成のために重要であると考えられる変数（手先のジャークとコップの角度）がどのように変化するかを調べた。その結果、視覚を遮断することによって手先ジャークの値と、その協調には影響が見られなかったが、コップ角度についてはシフトし、その協調度は低下した。このことから、定常的な手先振動の抑制に対して視覚情報は、コップ角度のキャリブレーションに用いられていること、安定した協調動作の維持には性能変数とその目標値の知覚が重要であることが示唆された。また、手先のジャークは視覚情報がなくても制御可能であることが示唆された。今後の課題として、定常時ではなく、外乱を与えた際に視覚情報はどのような働きを示すのかを調べる事が挙げられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり貴重な助言を頂いた、名古屋大学田地宏一准教授に感謝致します。また、本研究は科学研究費補助金基盤型研究 (B) No.21300092, (C) No.23560526 及び若手研究 (B) No.20780165 により行われた。

文 献

- [1] 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二, “歩行中の手先振動を抑制する方策に対する UCM 解析,” 信学論 (D), vol. J93-D, no.12, pp.2666–2674, Dec. 2010.
- [2] J.P. Scholz and G. Schöner, “The uncontrolled manifold concept: Identifying control variables for a functional task,” *Exp Brain Res*, vol.126, pp.289–306, 1999.
- [3] M.L. Latash, J.P. Scholz, and G. Schöner, “Motor control strategies revealed in the structure of motor variability,” *Exerc Sport Sci Rev*, vol.30, pp.26–31, 2002.
- [4] M.L. Latash, “Stages in learning motor synergies: A view based on the equilibrium-point hypothesis,” *Human Movement Science*, vol.29, pp.642–654, 2010.
- [5] 北川哲生, 福田浩士, 福村直博, 宇野洋二, “ヒトの運動が手先の位置知覚に与える影響,” 信学技報, NC2004-151, 2005.
- [6] 今川英紀, 福村直博, 宇野洋二, “ヒトが知覚する腕の長さと言先位置の誤差に関する研究,” 信学技報, NC2006-159, 2007.
- [7] J. Verrel, “Distributional properties and variance-stabilizing transformations for measures of uncontrolled manifold effects,” *J. Neuroscience Methods*, vol.191, pp.166–170, 2010.
- [8] L.G. Carlton, “Processing visual feedback information for movement control,” *J Exp Psychol*, vol.7, pp.1019–1030, 1981.
- [9] M.A. Khan, G. Lawrence, A. Fourkas, I.M. Franks, D. Elliott, and S. Pembroke, “Online versus offline processing of visual feedback in the control of movement amplitude,” *Acta Psychologica*, vol.113, pp.83–97, 2003.
- [10] L.E. Brown, D.A. Rosenbaum, and R.L. Sainburg, “Limb position drift: Implications for control of posture and movement,” *J Neurophysiol*, vol.90, pp.3105–3118, 2003.
- [11] 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二, “歩行中の手先振動の抑制に対する視覚の働き,” 第 25 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.139–142, 2010.
- [12] W.-L. Hsu, J.P. Scholz, G. Schöner, J.J. Jeka, and T. Kiemel, “Control and estimation of posture during quiet stance depends on multijoint coordination,” *J Neurophysiol*, vol.97, pp.3024–3035, 2007.
- [13] V. Krishnamoorthy, J.-F. Yang, and J.P. Scholz, “Joint coordination during quiet stance: Effects of vision,” *Exp Brain Res*, vol.164, pp.1–17, 2005.
- [14] R. Ranganathan and K.M. Newell, “Motor synergies: feedback and error compensation within and between trials,” *Exp Brain Res*, vol.186, pp.561–570, 2008.
- [15] Y. Tseng, J.P. Scholz, and G. Schöner, “Goal-equivalent joint coordination in pointing: Affect of vision and arm dominance,” *Motor Control*, vol.6, pp.183–204, 2002.
- [16] T. Pozzo, A. Berthoz, and L. Lefort, “Head stabilization during various locomotor tasks in humans,” *Exp Brain Res*, vol.82, pp.97–106, 1990.
- [17] B. Bril and A. Ledebt, “Head coordination as a means to assist sensory integration in learning to walk,” *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol.22, no.4, pp.555–563, 1998.
- [18] 大山剛史, 宇野洋二, “ヒトの運動の計測軌道から計画軌道を推定する方法,” 信学論 (D-II), vol. J88-D-II, no.4, pp.800–809, April 2005.
- [19] 福井隆雄, 乾 敏郎, “視覚情報の到達把持運動に及ぼす影響,” 認知科学, vol.9, no.4, pp.487–500, 2002.
(平成 23 年 7 月 14 日受付, 10 月 3 日再受付)



東郷 俊太

平 21 名大・工卒。平 23 同大大学院工学研究科博士前期課程了。同年同大学院工学研究科・博士後期課程入学、現在に至る。身体運動の解析の研究に従事。日本神経回路学会、日本ロボット学会各会員。



香川 高弘 (正員)

平 18 豊橋技科大・工・博士後期課程単位取得退学。同年慶大・理工・生命情報学科助手。同大月が瀬りハビリテーションセンターに外向。平 19 名大・工・機械助教。博士(工学)、現在に至る。身体運動の解析とりハビリテーション工学の研究に従事。

計測自動制御学会, 電気学会各会員。



宇野 洋二 (正員)

昭 63 阪大大学院基礎工学研究科博士課程了。工博。同年東大・工・計数助手。平 3 同講師。平 4 ATR 人間情報通信研究所主任研究員。平 8 豊橋技科大情報工学系教授。平 18 名大・工・機械教授、現在に至る。生体の運動機能の研究に従事。日本神経回路学会, 計測自動制御学会各会員。

計測自動制御学会各会員。